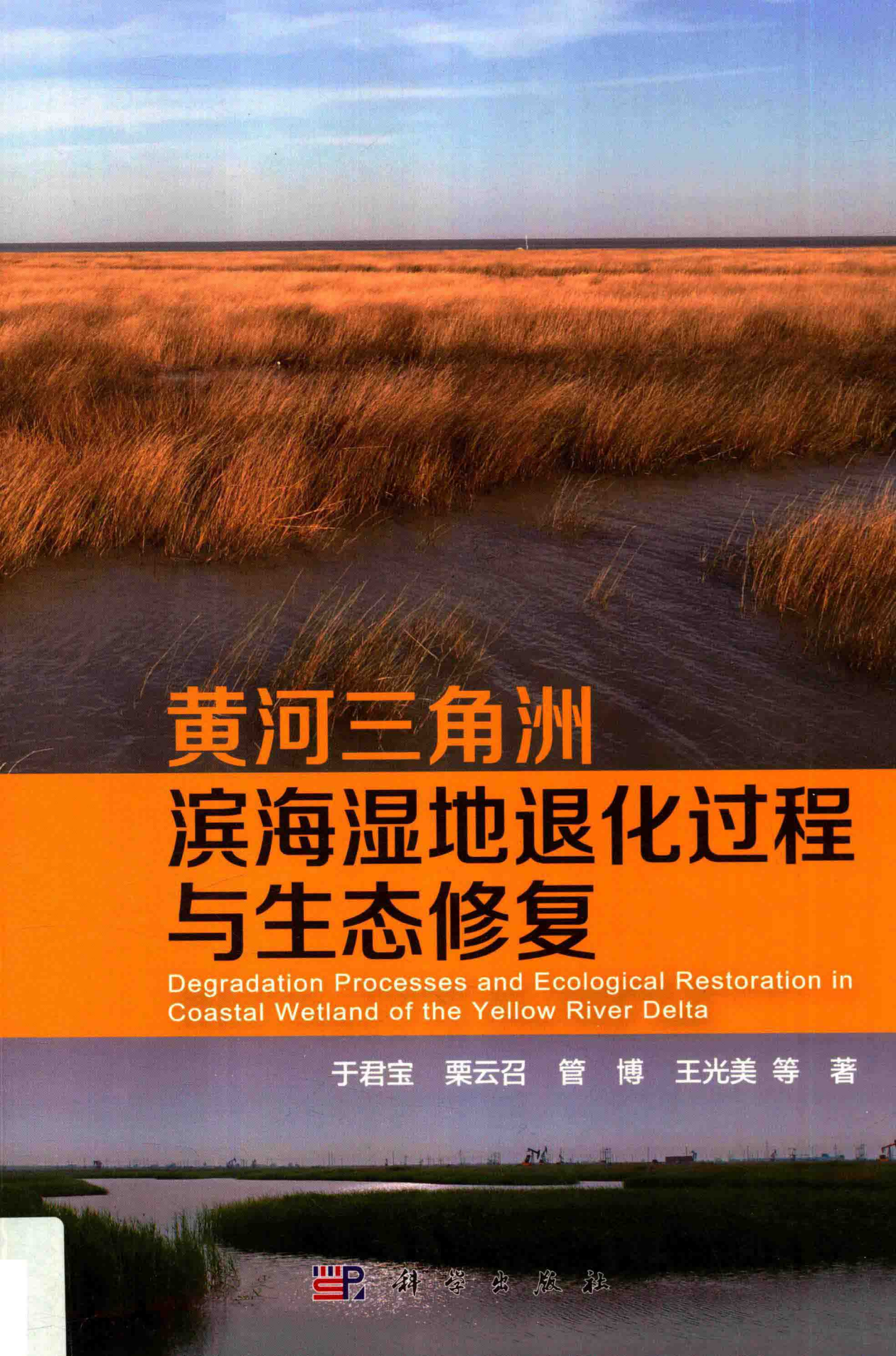




黄河三角洲 滨海湿地退化过程 与生态修复

Degradation Processes and Ecological Restoration in
Coastal Wetland of the Yellow River Delta

于君宝 栗云召 管博 王光美 等 著



科学出版社

黄河三角洲滨海湿地退化过程 与生态修复

Degradation Processes and Ecological Restoration in
Coastal Wetland of the Yellow River Delta

于君宝 栗云召 管 博 王光美 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以我国北方典型淤泥质海岸区域的黄河三角洲滨海湿地作为研究对象,在综合分析我国湿地生态修复技术国际地位的基础上,系统研究了黄河三角洲滨海湿地的演变过程、退化现状与驱动机制,湿地植被演替过程中土壤微生物群落的响应及影响因素。通过室内种子萌发控制实验、温室幼苗生长控制实验及野外微区修复试验研究了芦苇、碱蓬等典型退化滨海湿地类型的生态修复技术。针对黄河三角洲滨海湿地典型污染物,研究了滨海湿地石油污染土壤的植物-微生物联合修复技术,从分子生态学角度开展了重金属污染物对滨海湿地盐地碱蓬毒理效应的代谢组学与蛋白质组学研究。从土壤改良角度研究了滨海盐碱土的改良模式、培肥技术及生态绿化技术,探讨了多介质人工湿地构建及其对氮、磷的净化效率。在此基础上,建立了滨海湿地生态修复技术体系与示范区。

本书可供生态学、地理学、土壤学、环境科学、大气科学等专业的科研工作者、管理人员参考,也可作为上述专业研究生、本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

黄河三角洲滨海湿地退化过程与生态修复/于君宝等著. —北京:科学出版社, 2019.6

ISBN 978-7-03-061463-6

I. ①黄… II. ①于… III. ①黄河—三角洲—海滨—沼泽化地—土地退化—研究 ②黄河—三角洲—海滨—沼泽化地—生态恢复—研究 IV. ①P942.078

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 106415 号

责任编辑:王海光 闫小敏 / 责任校对:杨 赛

责任印制:吴兆东 / 封面设计:刘新新

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 6 月第一次印刷 印张: 32 1/2

字数: 771 000

定价: 298.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《黄河三角洲滨海湿地退化过程与生态修复》

著者名单

(按姓氏笔画排序)

于 淼	于君宝	王 庆	王永丽	王光美
王雪宏	毛培利	付玉芹	宁 凯	邢庆会
吕笑非	刘小莉	孙凯宁	杜朝红	吴惠丰
宋德彬	初小静	张振华	周 迪	郑 垒
屈凡柱	战 超	侯小凯	栗云召	董洪芳
韩广轩	谢宝华	褚 磊	管 博	阚兴艳

前言

湿地是自然界生物多样性最高的景观类型和人类最重要的生存环境之一，也是陆地表层生态系统的重要组成部分。滨海湿地是重要的湿地类型之一，位于海洋、淡水和陆地间的生态边缘区，受海陆相互作用影响显著，对全球气候变化响应敏感，气候变化所导致的海平面上升能够直接影响滨海湿地的物质循环、能量循环、湿地生产力、动植物生存，以及湿地的面积、种类、分布与功能，同时湿地变化又会改变湿地生态系统，进而加快气候变化的速度，其中气温上升和降水变化是影响湿地分布与功能的主要气候变化因素。更为重要的是，随着人类社会的发展，人类活动对湿地的影响越来越广泛、深刻。对湿地的开发、利用和改造，使湿地资源受到了严重的影响，导致湿地景观变化、面积萎缩、生物多样性丧失、生产力和净化能力下降。尤其是滨海区域，在经济快速发展和人口快速增长条件下承受着巨大的生态压力，全球有一半以上的人口集中在海岸带区域，而对湿地的盲目开垦和改造、对湿地资源的过度利用、湿地污染、湿地开发等已经成为导致我国滨海湿地减少与退化的主要原因。由于湿地退化严重影响区域生态、经济和社会的可持续发展，国内外对生态修复、重建越来越重视，我国近几年已经先后出台了湿地保护相关的政策措施，确定了湿地保护与生态修复/恢复目标，如国家林业局会同国家发展和改革委员会、财政部编制的《全国湿地保护“十三五”实施规划》（2017年）中湿地保护与修复目标为，到2020年，全国湿地面积不低于8亿亩^①，湿地保护率超过50%，恢复退化湿地14万hm²，新增湿地面积20万hm²（含退耕还湿），预投资177亿元；国家海洋局印发的《关于加强滨海湿地管理与保护工作的指导意见》（2016年）提出，力争到2020年，开展受损湿地生态修复，修复/恢复滨海湿地总面积不少于8500hm²；国务院办公厅于2016年11月30日印发了《湿地保护修复制度方案》（国办发〔2016〕89号）。可见我国对湿地修复的高度重视。此外，开展滨海湿地生态修复研究对于提升我国恢复生态研究的国际地位也具有重要意义。

本书通过文献检索方式分析了我国湿地修复技术在国际上的地位，其中外文文章检索主要基于ISI Web of Science的Science Citation Index Expanded数据库，中文文章基于CNKI数据库，专利检索采用ISI Derwent Innovations Index数据库、SooPat专利网数据库和中国科学院知识产权网（<http://www.casip.ac.cn/>）。通过遥感解译的方法研究了黄河三角洲滨海湿地演化过程，采用特定的空间分析方法对湿地的演变过程和退化现状、土地利用变化进行了分析，采用马尔科夫模型预测了2021年区域湿地演变趋势。通过野外定位观测系统地研究了区域道路交通对滨海湿地的影响。

通过室内种子萌发控制实验、温室幼苗生长控制实验及野外微区修复试验研究了芦苇、碱蓬等典型退化滨海湿地的生态修复技术，建立了重度退化碱蓬湿地和退化芦苇湿

^① 1亩=666.67m²

地生态修复技术体系, 获得了退化湿地最佳生态补水时间和补水量, 以及退化湿地生态修复的水、盐、养分调控技术。

利用野外长期监测样带, 研究了黄河三角洲滨海湿地微生物群落结构多样性及功能多样性, 环境因子对湿地微生物群落变化的影响, 获得了黄河三角洲滨海湿地土壤微生物的群落结构。

针对黄河三角洲滨海湿地主要污染物石油类和典型重金属 (Pb、Zn、Hg) 的污染问题, 建立了石油污染湿地土壤的植物-微生物修复技术, 筛选出具有高效降解石油能力的 3 种菌株; 采用蛋白质组学、代谢组学等实验技术手段研究重金属 (Pb、Zn、Hg) 污染物对盐地碱蓬的毒理效应, 筛选出了特异代谢物及蛋白质作为污染物风险评价的生物标志物。

针对滨海土壤的盐碱化问题, 从土壤改良角度研究了滨海盐碱土的改良模式、培肥技术及生态绿化技术, 研制了针对滨海盐碱土改良的有机无机复合肥和具有缓释性能的双包膜球形肥; 从生物多样性和水盐运移角度, 建立了滨海吹填土生态绿化技术。

利用湿地植物较高的氮、磷吸收特性, 探讨了湿地的净化功能, 成功构建了多介质人工湿地, 获得了具最佳净化生活污水效果的人工湿地植物排序方式。

在滨海湿地生态修复研究的基础上, 构建了滨海湿地生态修复技术体系, 建立了相应的示范区, 并对示范区修复效果进行了科学评估。

本书采用宏观与微观相结合的研究方法, 即从分子、微生物和群落等多角度进行研究; 野外监测、定位观测与实验室实验相结合; 机制研究与修复技术相结合; 小区实验与野外示范相结合。本书研究成果对滨海湿地生态健康与稳定的诊断和退化滨海湿地的生态修复具有重要的指导及借鉴作用。研究所获得数据均为原始观测数据, 研究结果具有代表性和指导性, 研发的生态修复技术均具有原创性。

书中的研究成果是研究组历届硕士研究生、博士研究生和合作伙伴共同努力完成的。全书由于君宝策划、统稿与定稿。第一章和第十一章由于君宝撰写, 第二章由栗云召、王永丽、周迪、于淼、王庆、于君宝撰写, 第三章由管博、于君宝、付玉芹、董洪芳、毛培利撰写, 第四章由王雪宏、于君宝、宋德彬、战超撰写, 第五章由吕笑非、于君宝、杜朝红、屈凡柱撰写, 第六章由阚兴艳、于君宝、宁凯撰写, 第七章由刘小莉、吴惠丰撰写, 第八章由郑垒、于君宝、王光美、褚磊撰写, 第九章由孙凯宁、于君宝、初小静、韩广轩、谢宝华撰写, 第十章由侯小凯、于君宝、邢庆会、张振华撰写。

本书的研究成果得到“十三五”国家重点研发计划项目“北方典型河口湿地生态修复与产业化技术”(2017YFC0505900)、山东省高等学校优势学科人才团队培育计划项目“蓝黄两区滨海资源与环境”、国家自然科学基金-山东省政府联合基金重点项目“黄河三角洲典型河口湿地生态网络构建及其资源环境效应”(U1806218)、中国科学院百人计划项目“泥质滨海湿地元素生物地球化学循环研究”、“十二五”国家科技支撑计划项目“典型湿地生态系统恢复与重建关键技术研究示范”(2011BAC02B01)、中国科学院知识创新工程重要方向项目“黄河三角洲滨海湿地退化机制及生源元素循环过程研究”(KZCX2-YW-223)、中国科学院-国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划项目“海岸带典型环境过程”、山东省自然科学基金杰出青年基金项目“生物地球化学与生态修复”

(JQ201114)、山东省科技攻关计划项目“黄河三角洲退化湿地碳、氮过程与生态安全优化管理”(2008GG20005006)、山东省可持续发展十大科技示范工程项目“黄河三角洲海岸带湿地保护与修复技术示范”(2008GG3NS07005)等支持,特此感谢!此外,感谢中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站对本研究工作的大力支持!

由于本书涉及的滨海湿地生态系统复杂,研究内容较多,加之作者水平有限,书中难免有不足之处,诚请读者予以指正,以便进一步补充完善。

于君宝

2018年12月

目 录

前言

第一章 湿地概论与生态修复技术	1
第一节 湿地概论	1
一、湿地的概念与分类	1
二、湿地的演变和退化	5
第二节 退化湿地生态修复技术	13
一、湿地生态修复技术类别	14
二、湿地生态修复技术发展总体评价	15
三、湿地生态修复技术的领先国家评价	20
四、湿地生态修复技术的研究群体评价	22
五、我国湿地生态修复技术发展态势评价	24
六、湿地生态修复重点核心关键技术分析——以植物修复技术为例	25
参考文献	26
第二章 黄河三角洲滨海湿地的演变过程与驱动机制	34
第一节 研究方法	34
一、黄河三角洲洲体发育	34
二、黄河三角洲岸线变化	34
三、湿地解译与建库	35
四、湿地变化与土地利用转化	35
五、湿地演变预测	36
六、公路材质对湿地植物群落的影响	37
七、其他相关技术指标	38
第二节 黄河三角洲的发育与演变过程	39
一、黄河入海河道变迁	39
二、黄河三角洲洲体发育	40
三、黄河三角洲岸线变化	43
四、面积与景观特征变化	48
五、洲体发育变化的影响因素	55
第三节 黄河三角洲湿地的演变与退化	60
一、湿地分类、建库与出图	60
二、黄河三角洲湿地类型和植被覆被变化的时空分布	64
三、黄河三角洲湿地面积变化过程	70
四、黄河三角洲湿地的土地利用变化	75

五、黄河三角洲湿地的退化过程.....	86
六、黄河三角洲湿地的演变趋势预测.....	90
第四节 黄河三角洲湿地演变与退化的驱动机制.....	95
一、黄河三角洲湿地演变与退化的主要驱动因子.....	95
二、黄河三角洲湿地演变的驱动力模型构建.....	109
参考文献	110
第三章 黄河三角洲盐地碱蓬湿地生态修复研究.....	115
第一节 研究方法.....	115
一、盐地碱蓬萌发机制的研究方法.....	115
二、水盐胁迫下盐地碱蓬幼苗响应机制研究方案.....	116
三、混合盐碱胁迫对碱蓬萌发及幼苗生长影响的研究方法.....	118
四、氮添加对盐地碱蓬幼苗耐盐性影响的研究方法.....	119
五、重度退化湿地生态修复的野外试验方法.....	121
第二节 温度及盐分对盐地碱蓬萌发的影响.....	122
一、温度对盐地碱蓬萌发的影响.....	122
二、盐碱及海水溶液对盐地碱蓬萌发的影响.....	123
三、盐碱对盐地碱蓬幼苗体内离子积累的影响.....	124
四、讨论分析.....	126
第三节 水位与盐分对盐地碱蓬幼苗生长和抗氧化酶活性的影响.....	127
一、地下水位与盐处理对盐地碱蓬生长的影响.....	127
二、地下水位与盐处理对盐地碱蓬叶绿素和类胡萝卜素含量的影响.....	130
三、地下水位与盐处理对盐地碱蓬抗氧化酶活性、丙二醛及蛋白质 含量的影响.....	131
四、地下水位与盐处理对盐地碱蓬离子含量的影响.....	131
五、讨论分析.....	133
第四节 混合盐碱胁迫对碱蓬萌发及幼苗生长的影响.....	134
一、混合盐碱胁迫对碱蓬种子发芽率的影响.....	135
二、混合盐碱胁迫对碱蓬种子发芽速度的影响.....	136
三、不同胁迫因子与碱蓬种子发芽指标的相关分析.....	136
四、混合盐碱胁迫对碱蓬幼苗根长的影响.....	137
五、混合盐碱胁迫对碱蓬幼苗干重的影响.....	138
六、讨论分析.....	138
第五节 氮素对盐胁迫下盐地碱蓬幼苗生长和离子积累的影响.....	139
一、盐地碱蓬幼苗生长对氮素和盐胁迫的响应.....	139
二、叶片含水率和各器官生物量对氮素和盐胁迫的响应.....	140
三、盐地碱蓬幼苗生理指标对氮素和盐胁迫的响应.....	142
第六节 黄河三角洲重度退化滨海湿地盐地碱蓬生态修复效果研究.....	144
一、生态修复对当年土壤关键理化指标及盐地碱蓬生长的影响.....	145

二、生态修复后次年土壤关键理化指标的变化	148
参考文献	152
第四章 黄河三角洲退化滨海芦苇湿地生态修复研究	156
第一节 试验样地与研究方法	156
一、研究区域与试验样地	156
二、修复湿地和参照湿地植物样品、土壤样品的采集	157
三、芦苇根芽繁殖的补水实验	158
四、水盐作用对芦苇种子繁殖的影响	159
五、规律性补水对芦苇生长的影响	159
六、施肥对湿地芦苇生长的影响	160
七、计算与分析方法	161
第二节 黄河三角洲退化滨海湿地芦苇种子繁殖研究	163
一、盐度对芦苇种子萌发的影响	164
二、水深对种子萌发的影响	165
三、芦苇种子的复萌与生长状况	165
四、讨论分析	167
第三节 黄河三角洲退化湿地芦苇根芽繁殖补水技术研究	169
一、补水时期对芦苇生态特征与土壤理化性状的影响	170
二、补水深度对芦苇生态特征与土壤理化性状的影响	180
三、讨论分析	190
第四节 黄河三角洲退化滨海芦苇湿地修复进程中植被的变化规律	192
一、退化滨海芦苇湿地修复进程中植被组成结构的变化	192
二、退化滨海芦苇湿地修复进程中物种丰富度和多样性的变化	194
三、退化滨海芦苇湿地修复进程中群落相似性的变化	196
四、讨论分析	196
第五节 黄河三角洲退化滨海芦苇湿地修复进程中土壤理化性质的变化特征	197
一、退化滨海芦苇湿地修复进程中土壤物理指标的变化规律	197
二、退化滨海芦苇湿地修复进程中土壤化学指标的变化规律	199
三、讨论分析	204
参考文献	206
第五章 黄河三角洲滨海湿地微生物群落结构和功能的研究	209
第一节 主要研究方法	209
一、全球湿地中细菌和古菌多样性的系统性分析方法	209
二、黄河三角洲滨海湿地细菌群落结构多样性的研究方法	210
三、黄河三角洲滨海湿地细菌群落功能基因多样性的研究方法	213
四、环境因子对湿地微生物群落变化的影响	214
第二节 湿地土壤微生物群落多样性、影响因子及研究手段	217
一、土壤微生物群落多样性	217

二、环境因子对土壤微生物的影响.....	218
三、湿地微生物群落研究.....	219
四、土壤微生物研究的主要技术手段.....	221
第三节 全球湿地中细菌和古菌多样性的系统性分析.....	223
一、湿地中细菌和古菌总况.....	224
二、细菌群落结构分析.....	224
三、古菌群落结构分析.....	230
四、湿地微生物多样性分析.....	232
第四节 黄河三角洲滨海湿地细菌群落结构多样性.....	234
一、黄河三角洲潮滩湿地土壤细菌群落结构.....	234
二、黄河三角洲新生湿地土壤细菌群落结构.....	236
三、黄河三角洲滨海湿地细菌群落分析.....	239
第五节 黄河三角洲滨海湿地细菌群落功能基因多样性.....	241
一、潮滩湿地细菌群落的功能基因.....	242
二、新生湿地细菌群落的功能基因.....	245
三、滨海湿地细菌群落功能基因稳定性分析.....	246
第六节 环境因子对湿地微生物群落变化的影响.....	248
一、黄河三角洲滨海湿地的环境因子.....	249
二、环境因子对滨海湿地细菌群落结构的影响.....	255
三、环境因子对滨海湿地细菌群落宏基因组的影响.....	257
参考文献.....	258
第六章 黄河三角洲滨海湿地石油污染土壤的植物-微生物联合修复研究.....	267
第一节 实验设计与研究方法.....	267
一、石油污染土壤生物修复原则.....	267
二、石油烃降解菌的富集、筛选、鉴定及微生物菌剂的制备.....	269
三、石油污染土壤的制备与梯度设置.....	272
四、石油污染对植物幼苗生长影响的实验设计.....	275
五、石油污染土壤生物修复效果研究.....	276
六、石油污染土壤生物修复后的主要特征指标.....	278
第二节 石油污染对植物幼苗生长的影响.....	279
一、土壤石油污染对芦苇和盐地碱蓬幼苗形态的影响.....	279
二、土壤石油污染对芦苇和盐地碱蓬幼苗叶片中可溶性蛋白质含量 和酶活性的影响.....	280
三、土壤石油污染对芦苇和盐地碱蓬幼苗叶片中丙二醛含量的影响.....	281
四、土壤石油污染对芦苇和盐地碱蓬幼苗叶片中叶绿素含量及叶绿 素 a/b 值的影响.....	282
第三节 石油污染土壤生物修复效果研究.....	283
一、石油污染对芦苇和盐地碱蓬生物量的影响.....	283

二、石油污染对芦苇和盐地碱蓬叶片中叶绿素含量的影响	284
三、不同生物修复处理下石油污染土壤前后总石油烃的降解率	286
四、不同生物修复处理下石油污染土壤前后石油烃各组分的降解率	287
五、微生物数目变化	288
第四节 生物修复过程中石油污染土壤主要特征指标的变化	289
一、土壤酶活性变化	289
二、土壤微生物活性变化	294
三、土壤呼吸作用强度变化	296
参考文献	297
第七章 黄河三角洲滨海湿地盐地碱蓬对重金属污染的响应	300
第一节 重金属对植物的毒理效应及组学技术应用	300
一、渤海区域重金属污染状况分析	300
二、重金属对植物的毒理效应	302
三、组学技术在生态毒理学中的应用	309
第二节 基于 NMR 技术的盐地碱蓬代谢组学研究体系	313
一、实验材料与方法	313
二、盐地碱蓬代谢谱图解析	314
三、盐地碱蓬代谢产物提取方法的探索与优化	316
四、甲醇/水溶剂体系的代谢组提取方法的验证	318
第三节 基于双向电泳-质谱检测技术的盐地碱蓬蛋白质组学研究体系	318
一、实验材料与研究方法	319
二、蛋白质双向电泳分析	323
三、双向电泳方法稳定性分析	323
第四节 铅、锌胁迫对盐地碱蓬毒理效应的代谢组学与蛋白质组学研究	324
一、盐地碱蓬暴露实验	324
二、铅、锌胁迫对盐地碱蓬毒理效应的代谢组学研究	327
三、铅、锌胁迫对盐地碱蓬毒理效应的蛋白质组学研究	330
四、铅、锌胁迫对盐地碱蓬生长、抗氧化酶系统及相关基因的影响	337
第五节 汞胁迫对盐地碱蓬毒理效应的代谢组学与蛋白质组学研究	340
一、实验材料与研究方法	340
二、盐介质条件下汞胁迫对盐地碱蓬毒理效应的代谢组学研究	341
三、盐介质条件下汞胁迫对盐地碱蓬毒理效应的蛋白质组学研究	344
四、盐介质条件下汞胁迫对盐地碱蓬生长、抗氧化酶系统及相关 基因的影响	351
参考文献	354
第八章 滨海吹填土原位改良模式及其生态绿化研究	362
第一节 我国滨海盐渍土分布及特征	362
一、盐碱土分布	362

二、滨海盐渍土.....	363
三、滨海盐碱土的特征.....	364
四、滨海吹填土改良技术.....	364
第二节 滨海吹填土绿化障碍特征.....	365
一、样品采集与理化性质分析.....	365
二、滨海吹填土绿化障碍特征分析.....	366
第三节 滨海吹填土水盐动态研究.....	367
一、实验材料与方法.....	367
二、滨海吹填土水盐动态室内模拟研究.....	371
三、不同处理下滨海吹填土的水盐动态.....	373
第四节 滨海吹填土生态绿化技术应用效果.....	376
一、生态绿化区滨海吹填土性状.....	376
二、滨海吹填土土壤改良与改良效果及生态绿化示范.....	377
参考文献.....	380
第九章 黄河三角洲滨海盐碱土培肥改良技术及效果评估.....	381
第一节 盐碱土改良及培肥技术.....	381
一、盐碱土改良的主要方式.....	381
二、秸秆还田对盐碱土的改良效果.....	382
三、有机肥与无机肥配施.....	384
四、有机无机复混肥.....	386
第二节 堆肥方式对棉花秸秆腐熟效果的影响.....	387
一、试验材料与方法.....	387
二、堆肥方式对棉花堆腐过程中温度的影响.....	389
三、堆肥方式对棉花堆腐过程中 pH 与电导率的影响.....	389
四、堆肥方式对棉花堆腐过程中营养元素的影响.....	390
五、棉花堆腐过程中 T 值的变化.....	392
六、堆肥方式对棉花堆腐过程中种子发芽指数的影响.....	393
七、棉花堆腐过程中各指标之间的相关性分析.....	394
第三节 棉花腐熟物类肥料的研制及其缓释性能评价.....	395
一、实验材料与方法.....	395
二、双包膜球形肥的形态学特征.....	398
三、双包膜球形肥对土壤最大田间持水量的影响.....	398
四、双包膜球形肥对土壤保水性的影响.....	399
五、双包膜球形肥的缓释性能.....	399
第四节 棉花还田对棉花生长和土壤性状的影响.....	400
一、试验材料与方法.....	401
二、棉花还田对棉花生长发育状况的影响.....	402
三、棉花还田对棉花土壤理化性质的影响.....	406

第五节 棉秆类复合肥料在湿地农田的肥效研究.....	415
一、试验材料与方法.....	415
二、不同肥料类型对棉花生长发育状况的影响.....	416
三、不同肥料类型对棉花果枝数与桃数的影响.....	417
四、不同肥料类型对棉花养分吸收状况和肥料利用效率的影响.....	419
五、不同肥料类型对棉花产量及其构成因素的影响.....	420
第六节 有机肥与无机肥配施对棉花生长及土壤性状的影响.....	421
一、试验材料与方法.....	421
二、不同施肥方式对棉花生长发育状况的影响.....	422
三、不同施肥方式对棉花果枝数与桃数的影响.....	423
四、不同施肥方式对土壤理化性质的影响.....	425
参考文献.....	433
第十章 多介质人工湿地构建及其氮、磷净化效率研究.....	439
第一节 人工湿地去污机制与应用.....	439
一、人工湿地简介.....	439
二、人工湿地的去污机制.....	442
三、人工湿地填料的选择.....	443
四、人工湿地植物的选择.....	444
五、影响人工湿地去污效率的主要因素.....	444
六、人工湿地的应用.....	445
第二节 人工湿地的构建与实验方案.....	446
一、人工湿地的构建.....	446
二、人工湿地的实验方案.....	450
第三节 多介质人工湿地各单元独立运行对生活污水中氮、磷的去除效率.....	451
一、纯土壤和纯基质系统对生活污水中氮、磷的去除效率.....	452
二、各湿地单元对生活污水中氮、磷的去除效率.....	455
三、各湿地单元溶解氧的变化.....	459
四、各湿地单元 pH 的变化.....	460
第四节 多介质人工湿地系统整体运行对生活污水的净化效率.....	461
一、多介质人工湿地系统的化学需氧量净化率.....	461
二、多介质人工湿地系统对含氮污染物的净化.....	462
三、多介质人工湿地系统对含磷污染物的净化.....	465
四、多介质人工湿地系统沿程 pH 的变化.....	466
五、多介质人工湿地系统沿程溶解氧的变化.....	467
第五节 多介质人工湿地系统对实际生活污水的净化效率.....	468
一、多介质人工湿地系统对实际污水的化学需氧量净化率.....	469
二、多介质人工湿地系统对实际污水含氮污染物的净化.....	469
三、多介质人工湿地系统对实际污水含磷污染物的净化.....	471

四、多介质人工湿地系统处理实际污水过程中 pH 及溶解氧的变化	471
参考文献	472
第十一章 黄河三角洲滨海湿地生态修复技术体系与示范	475
第一节 滨海湿地生态修复技术	477
一、滨海湿地植物标志物指示技术	477
二、耐盐植物选育与快速繁殖技术	477
三、滨海湿地土壤养分调节技术	479
四、芦苇湿地淡水优化配置/生态补水技术	480
五、湿地多优势种培育技术	480
六、退化滨海湿地水盐控制技术	482
七、重度退化芦苇湿地土壤改良技术	482
第二节 退化滨海湿地示范区建设	483
一、退化湿地生态修复示范区建设	483
二、生物多样性保护示范区与滨海湿地野外研究平台建设	487
三、黄河三角洲滨海湿地生物多样性信息系统构建	492
参考文献	503

第一章 湿地概论与生态修复技术

第一节 湿地概论

一、湿地的概念与分类

(一) 湿地的概念

湿地是位于水生生态系统和陆生生态系统之间的过渡性地带,兼具水、陆生态系统的特点,是一种特殊的自然综合体。由于湿地分布广泛、类型较多、各亚类之间差异显著,因此很难给湿地一个明确的定义。就实际而言,湿地的概念主要取决于湿地工作人员的身份和湿地研究的对象及目的等。从整体上来看,关于湿地的定义可以分为两大类(殷书柏和吕宪国, 2006; Mitsch and Gosselink, 2007):一类是便于湿地管理的定义,湿地管理者和经营者关心湿地管理条件的制定,以了解、阻止或控制湿地的变化,因此需要准确且具有法律效力的湿地定义,如《关于特别是作为水禽栖息地的国际重要湿地公约》(以下简称《湿地公约》)中给出的湿地定义;另一类是便于进行湿地科学研究的定义,湿地科学家为便于湿地分类、野外调查和研究,考虑的是伸缩性大、全面且严密的湿地定义。由于湿地研究者的学科背景、研究区域及对象不同,其对湿地的定义也不同。目前国际上对湿地的定义超过了 60 种(McComb and Davis, 1998; Keddy, 2010),包括美国(Shaw and Fredine, 1956)、加拿大(Zoltai, 1979)、英国(Maltby, 1986)及苏联(博奇等, 1989)等国家对湿地的定义。但是英国及苏联关于湿地的研究更侧重于沼泽及泥炭湿地,湿地的定义主要局限于沼泽地和泥炭地。国际上,应用广泛且被接受的是如下几种定义。

(1) 1979 年由 Cowardin 提出,并为美国鱼类及野生动植物管理局(U.S. Fish and Wildlife Service)所采用的湿地概念(Cowardin et al., 1979)。该定义认为:湿地是陆生生态系统与水生生态系统之间的过渡性土地,水位较高,经常处于或者接近地表,或有浅水积水。湿地有以下至少一个特征:①土地上至少周期性地生长有占优势的水生植物;②基质中排水能力差的水成土占有优势;③基质非土质化,并且在植物的生长季节土壤水饱和或者被浅水覆盖。

(2) 加拿大的湿地定义:湿地是指水位接近或者高于地面,或水分饱和的时间足够长,以水成土、水生植物和适应潮湿环境的生物活动为特征的土地(Zoltai, 1979; Zoltai and Vitt, 1995)。

(3) 1971 年《湿地公约》对湿地的定义:湿地系指不论天然或人工、长久或暂时的沼泽地、泥炭地或水域地带,带有静止或流动的淡水、半咸水或咸水水体者,包括低潮时水深不超过 6m 的水域(Bureau, 1990)。

国内学者认为：湿地是“陆地上常年或季节性积水（水深不深于 2m，积水期达 4 个月以上）和过湿的土地，并与生长、栖息在其上的生物种群构成的独特生态系统”（刘厚田，1995；佟凤勤等，1995）。

总的来说，湿地一般具有三个方面的特征：地表在一年之中某段时间或长时间被水覆盖；拥有占优势的能够适应湿生环境的植物；土壤在湿生环境中发育。这是湿地研究者确定和描述湿地环境的依据（Charman，2002）。

WERG（Wetland Ecosystems Research Group）认为滨海湿地作为湿地的重要组成部分，是指发育在海岸带附近并且受海陆交互作用影响的湿地，广泛分布于沿海海陆交界、淡咸水交汇地带，是一个高度动态和复杂的生态系统（WERG，1999）。具体来讲，滨海湿地是指在海陆交互作用下经常被静止或流动的水体所浸淹的沿海低地、潮间带滩地及低潮时水深不超过 6m 的浅水水域。

(二) 湿地的分类

湿地的分类始于 20 世纪初学者对欧洲及北美泥炭地的分类，但是由于人们对湿地定义的认知不统一，因此到目前为止，世界上并没有形成一个统一的湿地分类系统。人们出于研究或者工作目的，可以从不同角度对湿地进行不同的分类。一般而言，湿地的分类方法包括：成因分类法、特征分类法和综合分类法（殷康前和倪晋仁，1998）。国际上有代表性的湿地分类系统有：美国湿地分类系统，加拿大全国湿地分类系统和《湿地公约》中的湿地分类系统。

作为一种成因分类法，Cowardin 等（1979）提出的分类体系（表 1-1）在美国湿地研究中占有举足轻重的地位，为美国鱼类及野生动植物管理局所采用，并且在美国以外的其他国家也具备适用性（Cowardin and Golet，1995）。该方法采用“系统-亚系统-类别”（system-subsystem-class）的层次体系进行分类，首先根据生态特征的相似度将湿地与深水生境分为 5 个系统，即滨海、河口、河流、湖泊和沼泽湿地系统，然后在每一个系统下，按地貌类型的不同分成亚系统，最后按照基底物质组成的不同分成湿地类，而湿地类还可以细分为亚类。对于特殊的湿地，还可以用能反映其特性的，如水文的、化学的、人为的特征等加以描述。

表 1-1 湿地和深水生境的分类系统

系统	亚系统	类别
滨海湿地	潮下带湿地	岩石基底湿地
		松散基底湿地
		水生生物湿地
		礁石类湿地
	潮间带湿地	水生生物湿地
		礁石类湿地
		岩石岸基湿地
		松散岸基湿地